

УДК 005.8

Комплексная методология управления спутниковым проектом на основе цифрового двойника прототипа

Татарченко Евгений Андреевич

ed@sep.center
SPIN-код: 1928-2406

АНО Исследовательский центр «Космическая экономика и политика», Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрен подход к управлению проектом малых космических аппаратов, в котором цифровой двойник прототипа используется как источник данных для выбора и адаптации методологии управления. Представлен веб-прототип АДАМАНТ, формирующий цифровое представление по геометрической 3D-модели аппарата и параметрам миссии. Показано, что сочетание многокритериальной схемы выбора (АНР-подобная оценка с некомпенсаторной veto-логикой) и генерации артефактов проекта (вероятностный календарный план, WBS, реестр рисков, бюджет, матрица V&V) позволяет связать инженерные модели и проектные решения. Сделан вывод о применимости подхода на ранних стадиях CubeSat-миссий при высокой неопределенности и ограниченных ресурсах.

Ключевые слова: цифровой двойник, малый космический аппарат, CubeSat, управление проектом, гибридная методология, риск-менеджмент

Введение. Цифровые двойники рассматриваются как ключевой элемент цифровой инженерии и модельно-ориентированного системного инжиниринга (MBSE), обеспечивающий прослеживаемость через digital thread и поддержку решений на протяжении жизненного цикла [1, 2]. В аэрокосмической области одним из ранних системных изложений парадигмы цифрового двойника является работа NASA о применении высокодостоверного моделирования для повышения надежности и безопасности [3]. При этом управленческие задачи спутниковых проектов (выбор каскадной, гибкой или гибридной методологии, планирование с учетом неопределенностей, риск-менеджмент и бюджетирование) часто остаются отделенными от цифровых инженерных моделей. Отдельные практики гибридизации процессов, например Agile Stage-Gate в проектах 1U CubeSat, демонстрируют эффект итеративной разработки, но опираются на экспертный выбор и не дают формализованной связи с параметрами изделия и миссии [4].

Методы и материалы; результаты. В АДАМАНТ цифровой двойник прототипа задается совокупностью: 3D-геометрии аппарата, контекста миссии (ограничения по срокам, бюджету, ресурсам команды) и управленческой модели проекта [5]. На основе этих данных выполняется выбор методологии между Waterfall/V-model, гибридным подходом и гибким. Выбор реализован через набор критериев (неопределенность требований, сложность «железа», доля ПО, критичность миссии, регуляторные ограничения и др.) с интегральной АНР-подобной оценкой. После выбора методологии формируются клю-

чевые артефакты управления: вероятностный календарный план, иерархическая структура работ (WBS) до 3-го уровня, реестр рисков, бюджетная структура и матрица верификации и валидации (V&V). Технические практики снижения рисков разработки, включая HIL/SIL-испытания для CubeSat, рассматриваются как часть контура верификации, но дополняются связью проектных решений с цифровым представлением прототипа [6].

Заключение. Предложенная методология демонстрирует возможность использовать цифровой двойник прототипа не только для инженерного анализа, но и как опорную модель для «доказательного» выбора процесса управления и формирования базового комплекта проектных документов. Подход наиболее применим на ранних этапах малых миссий, где ресурсы ограничены, а неопределенность высока. Ограничения текущего состояния прототипа связаны с отсутствием интеграции с CAD/PLM и с необходимостью дальнейшей калибровки эвристик планирования и оценки рисков на данных реальных проектов.

Список источников

- [1] Madni A.M., Madni C.C., Lucero S.D. Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering. *Systems*, 2019, vol. 7, no. 1, art. no. 7. <https://doi.org/10.3390/systems7010007>
- [2] Liu M., Fang S., Dong H., Xu C. Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, vol. 58, pp. 346–361. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>
- [3] Glaessgen E.H., Stargel D.S. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, 2012. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20120008178> (accessed 06.11.2025).
- [4] García-Sánchez E.R., Vargas-Martínez H.S., Candia-García F., Contreras-Lima J. Agile Stage-Gate Approach for Design, Integration, and Testing of a 1U CubeSat. *Aerospace*, 2024, vol. 11, no. 4, art. no. 324. <https://doi.org/10.3390/aerospace11040324>
- [5] ADAMANT. URL: <https://adamant.framer.media> (дата обращения 28.10.2025).
- [6] Kiesbye J., Messmann D., Preisinger M. et al. Hardware-In-The-Loop and Software-In-The-Loop Testing of the MOVE-II CubeSat. *Aerospace*, 2019, vol. 6, no. 12, art. no. 130. <https://doi.org/10.3390/aerospace6120130>